增压液幕床流动脉动特性的实验研究

胡正涛，李炼，李娜，周屈兰

（西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室，陕西 西安 710049）

摘　要：本文设计并搭建了增压液幕床压力监测实验系统，通过调节增压液幕床中的气液流速以及工作压力等参数对增压液幕床中的流动特性进行研究并重点对压差脉动特性及阻力系数变化规律进行分析。通过结合实验数据及理论分析，得出压差脉动强度及阻力系数在不同气液流速和工作压力下的变化规律，并结合烟气脱硫气液吸收反应的原理对最优工作参数进行分析。该研究可为增压液幕床气液反应系统的工业化应用提供重要的设计参考。

关键词：增压液幕床；脉动强度；压差；阻力系数

中图分类号：X701.3　　　　　　**文献标识码：**J

Experimental Research on Flow Pulse Characteristics of Pressurized-Liquid-Screen Bed

HU Zheng-Tao, LI Lian, LI Na, ZHOU Qu-Lan

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Shaanxi Xi'an, 710049)

Abstract: The experimental monitoring system of pressurized-liquid-screen bed was designed and set in this paper. The flow characteristics were studied especially the analysis of differential pressure pulse characteristics and friction factors variation by the way of adjusting gas flow, liquid flow and operation pressure parameters. According to the analysis of comparing experiment data and theory, the variation principle of pressure pulse intensity and friction factors under different gas flow, liquid flow and operation pressure was revealed as well as the optimal operation parameter was analyzed through combining the principle of fume desulfurization gas-liquid interactive reaction. This paper provides the crucial design references to the industrial application of pressurized-liquid-screen gas-liquid reaction system.

Key words: Pressurized-liquid-screen; Pulse Intensity; Differential Pressure; Friction Factor

0 引言

气液交互作用是影响气液吸收的重要因素。为提高其气液交互作用，在传统的“喷淋法”基础上，清华大学研究了液柱喷射技术的性能及相关影响因素[1]；浙江大学提出液柱冲击式装置[2,3]；石油大学研究了液柱式塔内气两相间的流动特性和传质过程，发现在液柱塔内存压力梯度急剧变化区域，该区域为吸收烟气硫分的关键位置[4]；西安交通大学提出了液幕状气液两相流，该流型同时汲取喷淋法、液柱法和鼓泡床等技术的优点[5-8]。本文在液幕床的基础上提出增压液幕床，通过提高液幕床的气相工作压力，使气体质量流量增加，即增加气液接触量以提高气液交互作用，进而提高气液传热与传质效率。气液交互作用段的气相流动脉动特性是影响其脱硫效率的重要参数。为系统研究压差及其脉动和阻力系数对气液交互作用的影响规律，本文搭建了增压液幕床压力监测实验系统平台，控制并改变增压液幕床的气液流量和工作压力参数对其规律进行探究。实验数据与理论分析可为提高增压液幕床气液两相流交互作用提供理论依据，并为其工业化应用的参数设计提供重要参考。

1 实验系统

本实验在增压液幕床压力监测实验系统平台上进行。实验系统示意图如图 1 所示。

增压液幕床压力监测实验系统平台部分由上方吸收段和下方混合段构成。在吸收段内循环浆液与烟气充分接触；在混合段内，经过气液交互作用后的浆液与新鲜浆液混合。本实验选用逆流式的吸收塔，塔内气流方向与液体下落方向相反。为了便于观测塔内液幕床的流动状态，选用厚度 11 mm、直径 110 mm 的有机玻璃管制作塔身。塔身高度为 1000 mm，其内通道截面为直径 88 mm 的圆形。吸

收塔内下部布置浆液喷嘴。喷嘴阵列采用发散状等距排布。本文采用喷嘴个数为 16 的 2×8 型喷嘴，如图 2 所示。

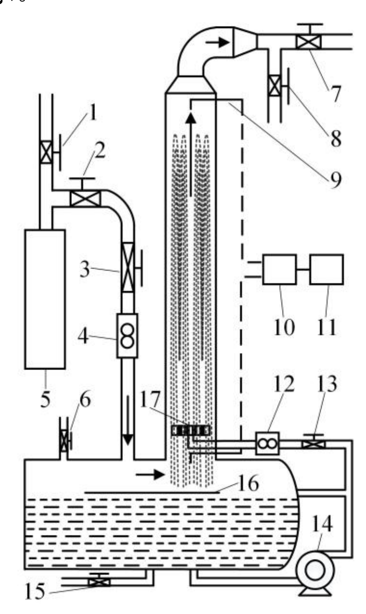


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Experimental system schematic diagram

1—旁路阀门；2—减压阀；3—供气阀门；4—气体涡轮流量计；5—空压机；6—加浆口；7—压力控制阀；8—泄压阀；9—引压管；10—压差传感器；11—数据采集系统；12—电磁流量计；13—送浆阀；14—离心泵；15—排水阀；16—防溅挡板；17—喷嘴

图 2 2×8 喷嘴阵列和喷嘴结构示意图

Fig. 2 2×8 nozzle array and structure diagram

液相循环系统的作用是供应吸收液以及将吸收液回收并进行循环。本文用水来模拟浆液。液相循环系统主要由浆池、循环水泵、阀门、电磁流量计、防溅挡板等部件组成。液体流量由型号为 LD-15/Y/ZA/AC/If/N/T2/PTFE/316L 的电磁流量计测量，量程为 0.2 $m^3\ h^{-1}$～6.0 $m^3\ h^{-1}$，精度为 1 级。

烟气系统的作用是供应模拟烟气并将气液充分接触后的烟气排入大气。本文采用空气来模拟烟气。烟气系统主要由空压机、控制阀、烟道、气体涡轮流量计等组成。烟气流量使用气体涡轮流量计 LWQ-40E 进行测量。该气体涡轮流量计的量程为 3 $m^3\ h^{-1}$ ~60 $m^3\ h^{-1}$，精度为 1.5 级。

压差测量系统采用西安新敏电子的 CYB21 型微压差变送器，测量量程为 0~1.5 kPa，精度为 0.3%，输出信号为 4~20 mA，响应时间小于 1 ms。供电电源采用安泰信 APR3002A。压力脉动的数据采集卡选用 National Instruments (NI)公司生产的 PCI-6013 卡，采样率为 200 kS/s/Ch，分辨率为 16 bit。

本文选取 2×8 型喷嘴，选取一定范围的气相压力与气体流量进行实验。由于气相作用液幕床床层高度有较大影响，液体流量在整个实验中的变化范围很大，所以难以控制相同液体流量进行研究，固在实验段中均匀选取 10 个床层高度区域，当床层高度稳定在相应区域内时即时读出对应的液体流量进行分析。

2 数据分析方法

概率密度函数分析法（PDF, Probability Density Function）是时域分析的一种，它是描述随机变量的概率分布。

如果存在一个函数 f，使得对区间 $-\infty < x < \infty$ 中所有 x 都有 $f(x) \ge 0$，事件 $A = \{x : a \le x \le b\}$ 有：

$$f(x) = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{p(x \le X \le x + \Delta x)}{\Delta x} \tag{1}$$

$$P(A) = \int_A f(A)dx = \int_b^a f(x)dx \tag{2}$$

可以用下式求得 $f(x)$ 的近似值：

$$f(x_i) \approx \frac{P_i}{\Delta x} \tag{3}$$

式中：

Δx——组距；

P_i——第 i 组的概率；

P_i 可以由下式求得：

$$P_i = \frac{n_i}{N} \tag{4}$$

式中：

n_i——子样点 x_i 出现的频数；

N——母体中子样点的数目。

对于稳态流动，在足够长的时间范围内对波动

信号取值，则得到的概率密度函数与时间无关[11]。

本文通过压差脉动范围、压差脉动均值、压差脉动峰值、压差脉动均匀度和阻力系数，这五个参数对增压液幕床气液两相流的流动脉动进行描述。定义压差分布范围 $l_{\Delta P}$ 为吸收塔气相压差的极差；定义压差脉动均值 ΔP_a 为吸收塔气相压差在单位时间内所采集到的所有压差数据值的平均值；定义脉动峰值压差 ΔP_p 为吸收塔气相压差 PDF 峰值所对应的压差值。

3 理论模型分析

如图 3 所示，将单个液体颗粒在吸收塔中的运动轨迹分为 A、B、C、D、E 五个区域，这些区域并不是绝对的空间位置，其划分取决于液体颗粒运动速度 v_s、气体绝对速度 v_g、气液相对速度 s、终端沉降速度 s_z 和液体颗粒粒径 d_s。A 区域为液体颗粒运动速度 v_s 大于气体流速 v_g；B 区域为气体流速 v_g 大于液体颗粒运动速度 v_s；C 区域为液体颗粒加速下落区域，此区域受液体颗粒粒径 d_s 影响较大，d_s 越大的颗粒 C 区域覆盖范围越广；D 区域中的粒子受自身脉动及气相作用脱离床层；E 区域中的粒子达到终端沉降速度 s_z 后进行匀速运动。

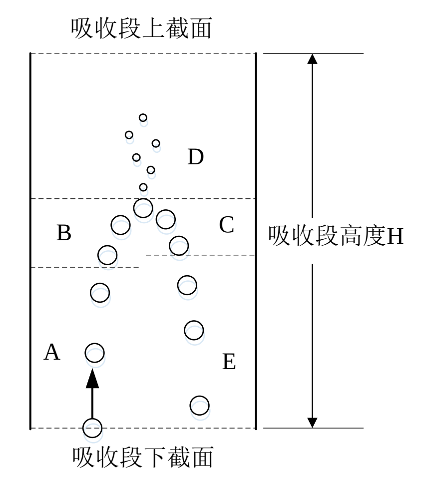


图 3 吸收段内液体颗粒的空间分布示意图

Fig. 3 Droplet spatial distribution in absorption area diagram

喷射的液体在达到顶点前与气体同向流动，达到顶点后与气体逆向流动。液体在上升的过程中，当液体颗粒速度 v_s 较高时，在图 3 中 A 区域，液体对气体存在加速作用，在一定程度上减小实验段气相压差；当液体颗粒速度 v_s 较低时，在图 3 中 B 区域，液体对气体存在阻碍作用，在一定程度上增大实验段气相压差；液体在回落过程中，在图 3 中 C 区域，未达到界限粒径的液滴对气体流动的阻碍作用随下落距离的增加而增加。达到界限粒径的液滴在图 3 中 D 区域以及 E 区域，对气体流动的阻碍则不再增加。

当气相压力增加后，气相的质量流量 W、密度 ρ、运动粘性系数 μ 均增加。因而气体的动能动量增加，对液体的冲击及携带作用都增加，同时，液体在吸收段内受到的浮力 f_b 也会增加，且终端沉降速度 s_z 会变小，界限粒径 d_z 变大，也会促进小粒径液体间的结合，即有更多的液体颗粒进入 D 区域后结合成大粒径液体回落，提高气液接触量与接触时间。以上诸多影响使得气相压差及其脉动强度增大。

4 实验结果与分析

4. 1. 1 压差脉动分析

增压液幕床吸收段中的气相压差脉动同时受气相和液相的影响，由液体喷射带来的压差脉动直接由气液间相互作用产生，由气相运动带来的压差脉动也可以增强气液的接触与混合。由于本文中数据采集采用单位时间内等次数采集，所以每次 PDF 分析时图中数据数量相同，所以由此得到的压差脉动范围 $l_{\Delta P}$ 可以用来表述当前工况下压差值可能覆盖到的范围，而 PDF_{max} 则可用来表示压差分布的集中程度，以上两个参数可用来反映压差脉动强度。且压差脉动强度与 $l_{\Delta P}$ 呈正相关，与 PDF_{max} 呈负相关。

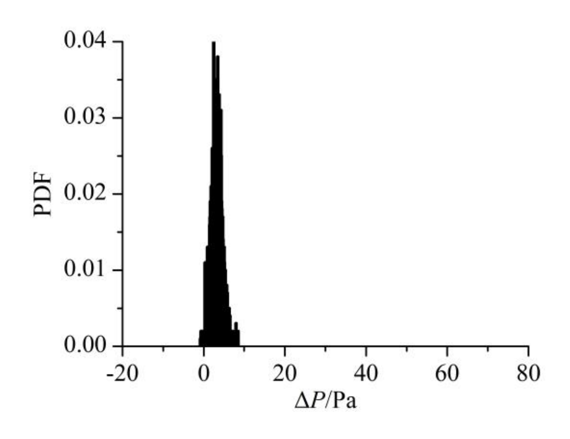
选取工况中的第六个区域对应的数据，不同气体流速对应的压差概率密度分布函数（PDF）分析结果见图 4。相同气相压力（选取 P=0.3 MPa）、相同气流速度（选取 v_g=1.80 m s^{-1}）时，不同液体喷射速度对应的压差概率密度分布函数（PDF）分析结果见图 5。相同气流速度（选取 v_g=1.80 m s^{-1}），相同液体喷射速度（选取床层高度范围在工况中的第六个区域对应的数据），不同气相压力对应的压差概率密度分布函数（PDF）分析结果见图 6。不同气相压力对应的压差脉动范围 $l_{\Delta P}$ 随液体喷射速度的变化规律如图 7 所示。有以下规律：

（1） 气流速度较低时， PDF_{max} 较高，ΔP_p 较低，压 $l_{\Delta P}$ 较小，因而压差脉动强度较弱。随着 v_g 的升高， PDF 图像右移， PDF_{max} 降低，ΔP_p 明显增加，$l_{\Delta P}$ 扩大，压差脉动强度与气体流速正相关。

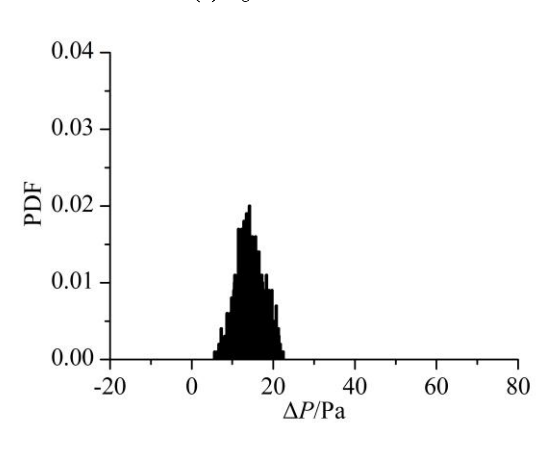
（2） 随着液体喷射速度的增加，PDF 图像向右略有移动，图形形状较为稳定，ΔP_p 增加，而其余脉

动强度参数基本保持稳定，压差脉动强度几乎不受液体喷射速度影响。

（3） 气相压力较低时，PDF_{max}较高，ΔP_p较低，$l_{\Delta P}$较小。随着气相压力的升高，PDF_{max}降低，脉动峰值压差略有提升，压差脉动范围大幅升高同时压差脉动范围的波动也随之加剧。压差脉动强度与气相压力正相关。



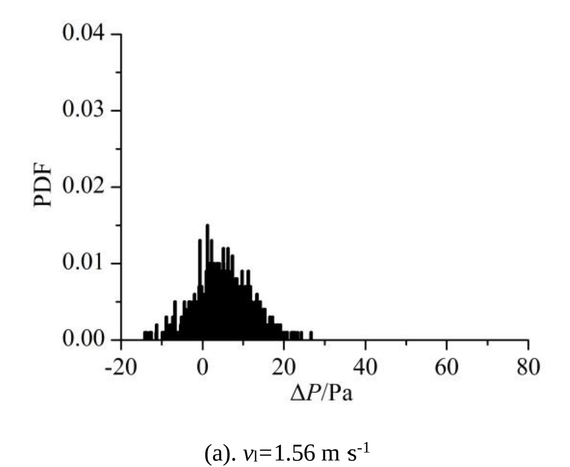
(a). v_g=0.91 m s^{-1}



(b). v_g=2.24 m s^{-1}

图 4 *P*=0.1 MPa，不同气流速度 v_g 对应的气体压降 PDF 图

Fig. 4 Pressure drop PDF with *P*=0.1 MPa and variable v_g

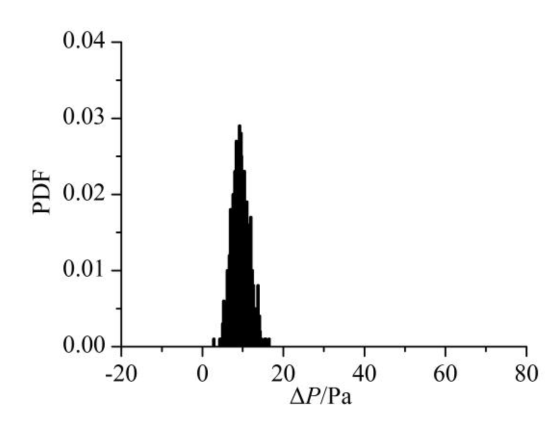


(a). v_l=1.56 m s^{-1}

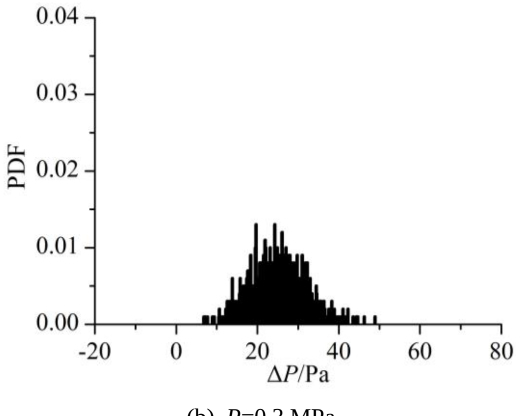
(b). v_l=3.80 m s^{-1}

图 5 *P*=0.3 MPa、v_g=1.80 m s^{-1}，不同液体喷射速度 v_l 对应的气体压降 PDF 图

Fig. 5 Pressure drop PDF with *P*=0.3 MPa, v_g=1.80 m s^{-1} and variable v_l



(a). *P*=0.1 MPa



(b). *P*=0.3 MPa

图 6 v_g=1.80 m s^{-1}，不同气相压力 *P* 对应的气体压降 PDF 图

Fig. 6 Pressure drop PDF with v_g=1.80 m s^{-1} and variable *P*

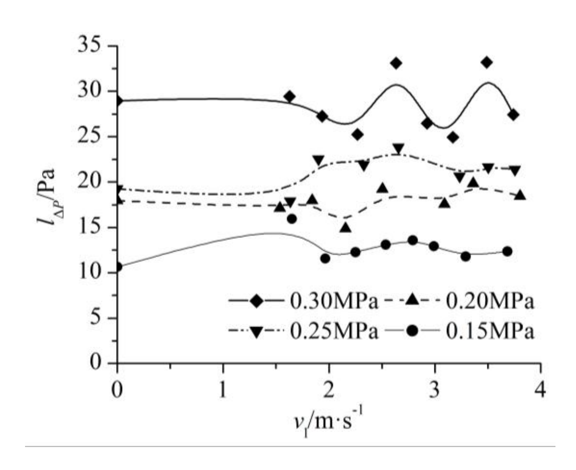
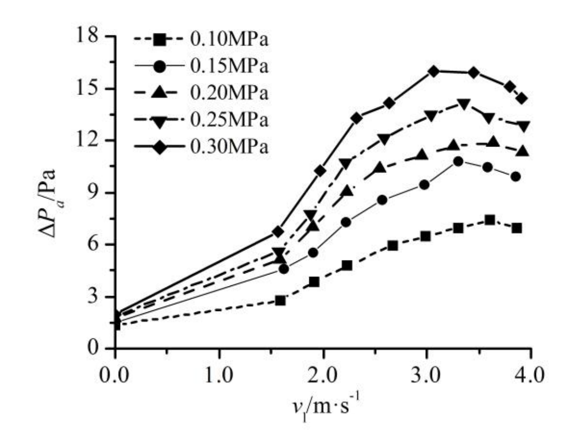


图 7 压差脉动范围 $l_{\Delta P}$ 与液体喷射速度 v_l 的关系图

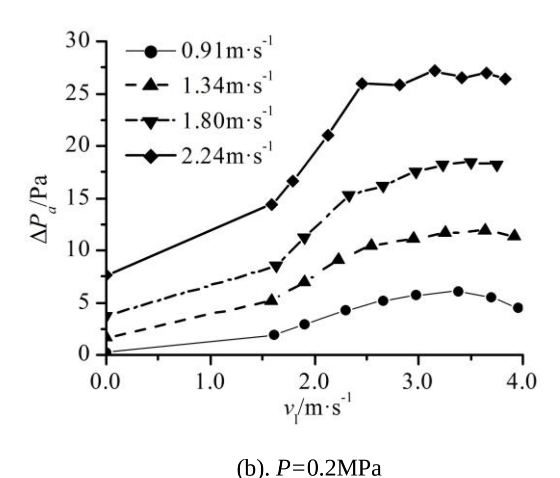
Fig. 7 Relationship between the range of pressure pulse $l_{\Delta P}$ and liquid jet velocity v_l

4.1.2 压差脉动均值分析

图 8(a)给出了气体流速相同、不同气相压力时压差脉动均值 ΔP_a 液体喷射速度 v_l 间的关系。随着 v_l 的增加，ΔP_a 先增加后减小，且气体流速越低时，压差变化的拐点所对应的喷射速度越低。随着气相压力的提高，实验段的压差明显升高。



(a). v_g=1.34 m s^{-1}



(b). P=0.2MPa

图 8 压差脉动均值 ΔP_a 与液体喷射速度 v_l 的关系图

Fig. 8 Relationship between the average of pressure pulse ΔP_a and liquid jet velocity v_l

图 8(b)给出了气相压力相同、不同气体流速时压差脉动均值 ΔP_a 与液体喷射速度 v_l 间的关系。随着 v_l 的增加，ΔP_a 先增加后减小，气体流速较低时此现象在更加明显，且压差变化拐点对应的喷射速度越低。随着气流速度的提高，实验段的压差明显升高。

当 v_l 较低时，上升过程中仅存在 B 区域，液体阻碍气体运动，回落过程中绝大多数颗粒达不到终端沉降速度 s_z；随着 v_l 增加，在上升过程中液体依然阻碍气体运动，而回落过程中液滴产生的阻碍作用持续增加，因而 ΔP_a 随之增长；当 v_l 继续增加，A 区域出现，而一定数量的回落液滴进入 E 区域，达到 s_z，因而 ΔP_a 的提高速率开始减慢，达到一个峰值；当 v_l 继续增加，A 区域范围随之增大，大量回落液滴进入 E 区域，达到 s_z，因而 ΔP_a 随之减小。当 v_g 增加时，A 区域形成并扩大所需的 v_l 提高，因而压差曲线的拐点对应的 v_l 越高。当气相压力增加时， A 区域易于形成并扩大，同时 s_z 减小，因而压差曲线的拐点对应的 v_l 越低，说明气液间的相互影响更为显著。

4.2 阻力系数分析

气液反应段的阻力系数是影响烟气脱硫效率和工业应用设计及经济性的重要因素。强烈的气液交互作用必然增加烟气流通的阻力，烟气流通关系到风机的效率和能耗。因而对阻力系数进行分析研究，可为脱硫塔的工业应用提供设计依据，更重要的是可以寻找到提高脱硫效率与提高电厂运行经济性的平衡点。

实验中吸收段整体的阻力系数如下：

$$\varepsilon = \frac{2\Delta P}{\rho v^2} \qquad (5)$$

式中：

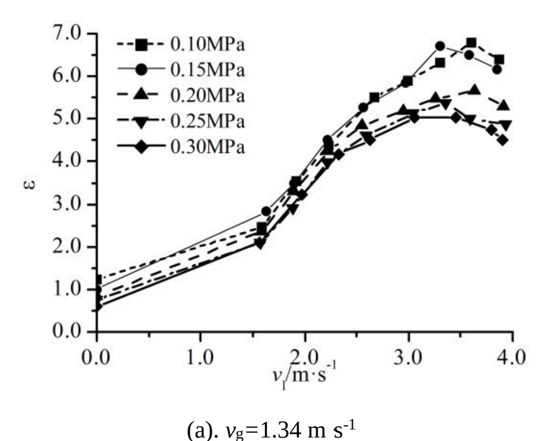
ΔP——吸收塔内烟气压降/Pa；

ρ——气体密度/kg m^{-3}；

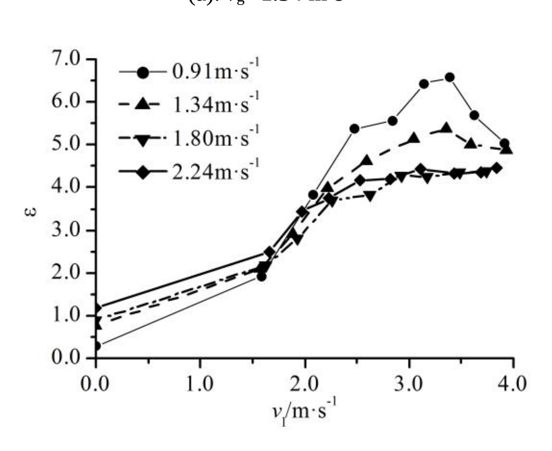
v——气体速度/m s^{-1}。

图 9(a)给出了气体流速相同、不同气相压力时实验段阻力系数 ε 与液体喷射速度 v_l 间的关系。随着 v_l 的增加，ε 先增加后减小。随着气相压力的提高，ε 明显减小。图 9(b)给出了气相压力相同、不

同气体流速时实验段阻力系数 ε 与液体喷射速度 v_l 间的关系。随着 v_l 的增加，ε 先增加后减小。v_g 越低 ε 变化的拐点所对应的 v_l 越低。当 v_l 小于 2.0 m s^{-1} 时，较低气体流速对应的 ε 较小，当 v_l 大于 2.0 m s^{-1} 时，较低气体流速对应的 ε 较大，v_l 在 2.0 m s^{-1} 附近为图中多条曲线的交点区域。



(a). v_g=1.34 m s^{-1}



(b). P=0.25 MPa

图 9 实验段阻力系数 ε 与液体喷射速度 v_l 的关系图

Fig. 9 Relationship between the friction factor ε and liquid jet velocity v_l

实验段对气相的总阻力 f 的变化情况可直接反应阻力系数 ε 的变化情况。v_l 较低时，C 区域出现并不断扩大而 A 区域并未出现，液体带来的阻力 f_w 持续增加，随着 v_l 持续增加，A 区域出现并扩大，C 区域扩大但增速减慢，E 区域出现并扩大，因而 f_w 持续增加，但增速减慢。当 v_l 继续增加到一定值时，A 区域持续扩大，而 C 区域维持稳定，E 区域持续扩大，因而 f_w 达到一个峰值后开始减小。

吸收段中无液体喷射时，实验段总阻力 f 主要来自于沿程阻力 f_L 和局部阻力 f_j。f_L 与 f_j 由实验段结构和气体流速所决定。当实验段结构不变时，f_L 和 f_j 与气流速度 v_g 成正比，v_g 越低对应的实验段总阻力系数 ε 也就越低。开始低速喷射液体时，液体对气相作用效果较弱，气流运动情况与空工况时类似。当 v_l 的值在 2.0 m s^{-1} 附近时，液体对气相运动的阻碍作用开始增强，由于此时液体速度依然较低，不存在 A 区域，C 区域对气体运动的影响较大，且低流速气体自身动能较低，受回落液体的影响较大，因而低气体流速下的阻力系数快速增长。由于低气体流速时，A 区域出现及扩大所对应的液体喷射速度较低，因而其 ε 达到峰值时对应的 v_l 也较低。

图 9 中 ε-v_l 曲线拐点右侧区域内 ε 会随 v_l 的增长急剧下降，可使风机能耗降低，但大量的液体喷射也提高了水泵能耗。且压差脉动平均值也随 v_l 的增长而急剧下降，不利于气液交互作用。而在曲线左侧为达到相应的压差脉动平均值只需提供较小的液体喷射速度。由 4.1.1 中结论可知压差脉动强度几乎不受 v_l 影响，所以增压液幕床吸收塔的最优工作参数应选取该图中 ε-v_l 曲线拐点左侧对应参数。

5 结　论

本文利用增压液幕床压力监测实验系统平台，对增压液幕床内气液两相流的流动脉动特性进行实验探究，并建立理论模型与实验数据相结合进行分析。得到了以下结论：

（1） 增压液幕床中喷射的液滴运动轨迹分为 5 个区域，这 5 个区域的划分取决于液体颗粒运动速度 v_s、气体绝对速度 v_g、气液相对速度 s、终端沉降速度 s_z 和液体颗粒粒径 d_s。A 区域中 v_s 大于 v_g；B 区域中 v_g 大于 v_s；C 区域中液体颗粒加速下落，此区域受 d_s 影响较大；D 区域中粒子脱离床层区域；E 区域中的粒子速度达到 s_z 后进行匀速运动。

（2） 随着气体流速 v_g 的增加，压差脉动均值 ΔP_a 增大，压差脉动强度增大。随着气相压力的增加，ΔP_a 和压差脉动强度均增大。ΔP_a 随液体喷射速度 v_l 的增加先增加后减小，而压差脉动强度与 v_l 相关性极小。

（3） 随着气体流速 v_g 的增加，阻力系数平均值和阻力系数分布范围均减小。低气体流速时随着气相压力的增加，阻力系数平均值减小而阻力系数分布范围增大，较高气体流速时，随着气相压力 P 的增加，阻力系数平均值和阻力系数分布范围基本稳定不变。阻力系数 ε 随液体喷射速度 v_l 的增加先增加后减小。

（4） 增压液幕床吸收塔的最优工作参数应选取为在 ε-v_l 曲线拐点左侧的对应参数。

参考文献

[1] 万玮. 液柱式湿法烟气脱硫系统中液柱喷射性能的研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
WAN Wei. Study on spray characters in liquid-column wet flue gas desulfurization system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2003.

[2] 程峰. 液柱冲击塔湿法烟气脱硫的试验和理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
CHENG Feng. Experimental and theoretical study on impinge stream scrubber wet flue gas desulfurization[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.

[3] 程峰, 骆仲泱, 高翔等. 液柱冲击塔湿法烟气脱硫的试验研究[J]. 浙江大学学报（工学版）, 2005, 39 (11): 1783-1787.
CHENG Feng, LUO Zhongyang, GAO Xiang, et al. Experimental study of wet flue gas desulfphurization of impinge liquid column tower[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2005, 39 (11): 1783-1787.

[4] 潘利祥, 孙国刚. 液柱脱硫塔压力特性研究[J]. 化学工程, 2006, 34 (6): 12-16.
PAN Lixiang, SUN Guogang. Pressure characteristics of liquid-column tower for flue gas desulfurization[J]. Chemical Engineering(China), 2006, 34 (6): 12-16.

[5] 周屈兰，徐通模，惠世恩. 我国自主开发的湿法脱硫技术及其应用[J]. 动力工程学报, 2006, 26 (2): 261--266.
ZHOU Qulan, XU Tongmo, HUI Shien. Development and Application of China's Own Wet Flue Gas Desulfurization Technique[J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26 (2): 261-266.

[6] KONG Dejuan, ZHANG Yafei, LI Na, et al. Experimental investigation on gas–liquid flow, heat and mass transfer characteristics in a dual-contact-flow absorption tower[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2014, 92(1): 13-24.

[7] LI Na, ZHOU Qulan, KONG Dejuan, et al. Mass transfer characteristics in double-contact-flow absorber with liquid column/screen flow type: Modeling and experiment[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(8): 2619-2628.

[8] SUN Zhongwei, WANG Shengwei, ZHOU Qulan, et al. Experimental study on desulfurization efficiency and gas–liquid mass transfer in a new liquid-screen desulfurization system[J]. Applied Energy, 2010, 87(5): 1505-1512.

[9] Lirag RC, Littman H. Statistical study of the pressure fluctuations in a fluidized bed[J]. Chem EngProg SympSeries, 1971, 67: 11-22.

[10] Eden D, Luckas M. A heat and mass transfer model for the simulation of the wet limestone flue gas scrubbing process[J]. Chemical engineering & technology, 1998, 21(1): 56-60.

[11] Jones O, Zuber N. The interrelation between void fraction fluction and flow patterns in two-phase[J]. IntJMultiphase Flow, 1975, (2): 273-306.

附页

1. 联系人：胡正涛

2. 地址：陕西省西安市碑林区咸宁西路 28 号西安交通大学能源与动力工程学院

3. 联系电话：18629566545

4. 电子邮箱：huzhengtao@stu.xjtu.edu.cn